DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201803057

混合盐碱胁迫对地被菊寒露红生长的影响

党培培[1]，李明宇[1]，赵喆[1]，王若水[2]，程瑾[1]，肖辉杰[2*]

（1. 北京林业大学生物科学与技术学院，北京 100083；2. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘要：盐碱胁迫作为主要非生物胁迫之一，已经成为制约我国农作物生产和生态环境建设的严峻问题。宁夏青铜峡地区属引黄灌溉区，土壤盐碱化导致园林绿化多以盐生植物为主，花卉种类缺乏。该研究以地被菊寒露红（*Chrysanthemum morifolium* 'Hanluhong'）为试验材料，一方面研究混合盐碱胁迫对其生长的影响，另一方面通过模拟青铜峡盐碱胁迫程度，探讨其在青铜峡地区的适生性。试验设置 3 个 pH 梯度（7.0，8.0，9.0），并在每个 pH 梯度下用 NaCl、Na_2CO_3、$NaHCO_3$、Na_2SO_4 配置不同浓度（0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%）的混合液对地被菊植株进行胁迫处理，观察并测定不同胁迫条件下植株株高、根长、光合特性及叶绿素荧光参数的变化。试验结果表明：（1）长时间生长在高盐碱环境会使地被菊寒露红生长缓慢，光合作用参数和叶绿素荧光参数下降。（2）青铜峡实验模拟组（pH=8.0，盐浓度为 0.4%）的植株株高、根长的伸长速度随胁迫时间的延长均呈先降低后升高的趋势；同时植株的光合作用参数、叶绿素荧光参数虽有降低趋势，但荧光参数下降变化未达到显著水平。综合分析可得，高盐、高碱环境均不利于地被菊寒露红植株的生长发育。在青铜峡地区的盐碱胁迫强度下，地被菊寒露红具有一定的抗盐碱性，基本能够正常生长，可用于当地植被及生态环境修复和园林造景。

关键词：混合盐碱胁迫，地被菊，株高，根长，光合特性，叶绿素荧光

Effects of Saline-Alkali Stress on the Growth of *Chrysanthemum morifolium* 'Hanluhong'

DANG Peipei[1]，LI Mingyu[1]，ZHAO Zhe[1]，WANG Ruoshui[2]，CHENG Jin[1]，XIAO Huijie[2*]

（1. *College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University*, Beijing 100083, China; 2. *School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University*, Beijing100083, China）

Abstract: As one of the major abiotic stresses, saline-alkali stress has become a severe factor that restricts crops production and ecological environment. The Qingtongxia area of Ningxia belongs to Yellow River Irrigation Area. The saline or alkaline land is only suitable for the halophilous plants, where ornamental plants are not easily found.This study intended to explore the effects of saline-alkali stress on the growth of *Chrysanthemum morifolium* 'Hanluhong' and the growth adaptability by simulating the saline-alkali stress intensity of Qingtongxia area. Three pH gradients (7.0，8.0，9.0) were set up in the experiment. Under each pH gradient, two neutral salts (NaCl and Na_2SO_4) and two alkaline salts (Na_2CO_3 and $NaHCO_3$) were used to configure mixed solutions with different saline concentrations (0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%) . Plant height, root length, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence were measured after each

基金项目：国家林业公益性行业科研专项项目（201504402）；国家重点研发计划（2017YFC0504400）[Supported by Special Fund for Forest Scientific Research in the Public Welfare (201504402) ; National Key Research and Development Program of China (2017YFC0504400)]。

作者简介：党培培（1994-），女，河北省保定人，硕士研究生，研究方向：植物生长发育，（E-mail）dangpeipei713@sina.com。

* 通讯作者：肖辉杰（1978-），男，博士，副教授，研究方向：盐碱地改良、水土保持及荒漠化治理研究，（E-mail）herr_xiao@hotmail.com。

treatment. The results showed that high concentration salt solution and pH value resulted in the decrease of these growth indexes. The elongation rates of plant height and root length decreased at first and then raised in the imitating group with pH 8.0 and 0.4% salt concentration. When the stressed time extended, the photosynthesis parameters, the maximum photochemical efficiency and the potential photochemical activity of photosystem Ⅱ decreased, but there was no significant among these fluorescence parameters. Considering the data of plant height, root length, photosynthesis and chlorophyll fluorescence, we deemed that high salt-alkali environment is not beneficial to the growth and development of *Chrysanthemum morifolium* 'Hanluhong'. But *Chrysanthemum morifolium* 'Hanluhong' could normally grow under the salt and alkali stress in Qingtongxia area. It could be used in vegetation and ecological environment restoration for its salt and alkaline resistance.

Key words: mixed saline-alkali stress, *Chrysanthemum morifolium* Ramat., plant height, root length, photosynthetic characteristics, chlorophyll fluorescence.

盐碱胁迫是制约植物生长发育的主要非生物因子之一（Luo et al，2018）。在土壤盐碱化地区，适生植物种类较少，生长缓慢，严重影响农业生产、生态环境及可持续发展（王佺珍等，2017）。地被菊（*Chrysanthemum morifolium* Ramat.）为菊科宿根草本植物，经长期人工杂交选育所得，其开花密集、花色多样且花期长，具有较高的观赏价值（Liao et al，2010）。此外，地被菊适应性强，耐盐碱，抗干旱，是园林绿化的重要植物，在造景、环境美化以及生态环境治理等方面有极其重要的作用。对地被菊抗性的研究表明地被菊能较好地适应寒冷、高温、干旱等环境，具有较高的应用价值（崔娇鹏，2005；Jing et al，2015；Zhang et al，2016）。近年来地被菊抗盐碱特性也日益受到人们的关注，时丽冉（2010）、张雨（2016）等人试验表明地被菊在一定盐浓度胁迫下各项生理指标相对稳定，是一种抗盐能力较强的地被花卉。在盐碱化地区地被植物引种研究中，地被菊因其适应性好，抗逆性强，已被作为盐碱地改良的优质物种得以应用和推广（张璐等，2010）。

盐胁迫不仅影响植物幼苗株高、根长、根数、生物量积累等形态指标（王萍等，2010；刘正祥等，2014），较高的盐浓度还会扰乱植物体内离子及渗透平衡（Ruiz et al，2016）。碱胁迫不仅含有与盐胁迫相同的胁迫因素，较高的 pH 环境还会影响植物根系的生长发育，阻碍矿质元素的吸收及离子稳态的重建（郭瑞等，2016），植物在应对碱胁迫时除了进行细胞内 pH 值调节，还须消耗大量的物质和能量来调节根际微环境的 pH 值，可见其危害明显高于盐胁迫（Shi &Wang，2005）。在我国，盐碱化地区大多为盐化与碱化并存的混合盐碱地，对植物的影响远高于单一盐、碱胁迫。就植物光合作用方面而言，盐溶液形成的离子和渗透胁迫使植株水分流失，降低气孔导度及蒸腾速率（李学孚等，2015），碱性环境易使 Mg^{2+}沉淀，阻碍叶绿素合成（Lu et al，2007），混合盐碱胁迫不仅存在上述危害，胁迫程度较高时还会使叶绿体结构发生显著变化，使光系统反应中心受损，光合电子传递和光系统光合作用活力被抑制（Kalaji et al，2016）。对此鞠淼（2008）和刘建新（2015）在燕麦幼苗的研究中也证实，盐胁迫及盐碱混合胁迫均会抑制燕麦幼苗的生长，导致光合参数、叶绿素荧光参数随盐浓度的增大而降低，且混合盐碱胁迫下降幅度大于盐胁迫。混合盐碱胁迫除了影响光合系统外，还会使植物结构发生变化，如叶片变薄，栅栏组织占比相对增加，茎表皮细胞变小变薄，胞壁角质层加厚，导管数量减少等，长时间胁迫还会影响花粉形态及柱头对花粉的接受能力，从而影响植物的生长发育（王志春，2010；牛陆，2013；田晨霞等，2014）。我国盐碱化比较严重的西北、东北、华北及滨海地区以多种盐分并存的混合盐碱地居多，因此，混合盐碱胁迫模拟实验更能真实地反应植株耐盐碱能力，而地被菊在混合盐碱胁迫下能够维持良好的生长状态是在盐碱地区推广的重要前提。

宁夏引黄灌溉区 44.11 万公顷耕地中，盐化面积为 14.79 万公顷，青铜峡地区位于黄河上游，宁夏平原中部，其灌区盐渍化耕地面积较大，占灌区盐渍化耕地总面积的 89 %（黄玉霞，2010）。樊丽琴等人（2012）研究表明，宁夏地区土壤中的阴、阳离子主要有 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等 8 种，为多种盐分混合的盐碱地。青铜峡地区不同地点盐碱浓度存在一定差异，总体上，0-80 cm 土壤全盐浓度为 0.384-0.409%，土壤饱和泥浆浸提液 pH 约为 8.0，分布的植物主要有柽柳（*Tamarix chinensis* Lour.），盐地碱蓬 [*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.] 及芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]（Yang et al, 2018），基本处于以盐生植物为主的状态，观赏类花卉种类匮乏。本研究以具有一定抗盐性的地被菊寒露红品种（*Chrysanthemum morifolium* ‘Hanluhong’）为试验材料，一方面研究混合盐碱胁迫对寒露红生长的影响，与此同时通过模拟宁夏青铜峡地区土壤的盐碱状况，测定植株的形态数据、光合特征参数以及叶绿素荧光参数，了解寒露红在青铜峡盐碱地的胁迫程度下的生长状况，探讨其在宁夏盐碱地的适生性，为当地植被修复的物种选择和园林绿化提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本次试验所用的地被菊寒露红植株由国家花卉工程技术研究中心提供。2017 年 6 月 11 日在温室内扦插育苗，于 7 月 16 日进行移栽，栽培基质为草炭土:蛭石:珍珠岩=2:1:1（v:v:v），移栽后进行常规管理，定植 7 d 待植株生长状态稳定，挑选长势一致，生长健壮的地被菊寒露红植株 360 盆进行试验，试验期间每天下午定时喷灌加湿 1 min 以保持土壤湿润。

1.2 方法

1.2.1 混合盐碱胁迫处理　根据李亚南等（2015）对轻度盐碱（1 m 土层内土壤含盐量 0.2% 以下）、中度盐碱（0.2%-0.6%）、强度盐碱（0.6%-1.0%）的划分标准，试验用 NaCl、Na_2CO_3、$NaHCO_3$、Na_2SO_4 按 1:1:1:1 的质量比混合，分别配成 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 的混合盐碱溶液模拟盐碱浓度，并同时设置 pH 梯度分别为 7.0、8.0、9.0，其中 pH=8.0，混合盐碱浓度为 0.4%的处理组与青铜峡地区的土壤情况最为接近。本次实验设计考虑到因素间相互作用，共设置 18 个处理组，pH=7.0，pH=8.0，pH=9.0 的处理组分别记为 A，B，C，盐碱浓度由低到高分别记为 0，1，2，3，4，5，如 pH=7.0，混合盐碱浓度为 0 的处理组记为 A0。上述处理组各处理植株 20 盆，每隔 5 d 对植株进行盐碱胁迫一次，每次每盆浇盐碱溶液 100 mL，连续处理 3 次，每次胁迫后 2 d 测定株高、根长以及光合特征参数，叶绿素荧光参数。

1.2.2 株高、根长的测定　使用直尺（量程 20 cm，精度 0.1 cm）测量植株株高、根长。

1.2.3 光合特征参数测定　于上午 9:00-10:00 使用便携式光合仪 Li-6400（LI-COR 公司，美国）的自然光源叶室，在室外测定植株的光合特征参数。选取从上往下第 4-5 叶位的叶片，测定参数主要包括净光合速率（*Pn*，$\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$），蒸腾速率（*Tr*，$mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$），气孔导度（*Gs*，$mmolH_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）及胞间 CO_2 浓度（*Ci*，$\mu molCO_2 \cdot mol^{-1}$），每个处理测定植株 3 株，每株记录 6 次数据。

1.2.4 叶绿素荧光参数测定　使用调制式叶绿素荧光仪 PAM-2500（WALZ 公司，德国）测定植株的叶绿素荧光动力学参数，测定初始荧光（F_o）、最大荧光（F_m），并利用公式计算 $F_v/F_m=(F_m-F_o)/F_m$，其代表光系统 II 最大光化学效率；$F_v/F_o=(F_m-F_o)/F_o$，其代表光系统 II 潜在光化学活性。仪器设定测量光强度为 860 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，光化光强度为 1300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，强饱和脉冲光强度为 3450 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，脉冲光时间为 0.5 s。每次测定前植株均暗适应处理 25 min。

1.3 试验数据处理与统计分析

运用 Miscrosoft office Excel 2016 对实验数据进行处理，使用 SPSS 20.0 软件对不同混合盐碱胁迫下植株株高、根长、光合参数和叶绿素荧光参数进行显著性分析。绘图软件为 SigmaPlot 12.5。

2 结果与分析

2.1 不同盐碱胁迫处理对植株株高变化的影响

盐碱胁迫前植株的平均株高为 12.42±0.81 cm（n=6）。如表 1 所示，盐碱胁迫处理 15 d 后，A、B 处理组株高均有所增加。A 处理组株高依次增加了 22.11%、25.60%、34.46%、29.90%、33.92%、9.23%，B 处理组株高依次增加了 28.82%、25.07%、22.65%、40.10%、31.78%、18.89%，A、B 处理组内随盐浓度的增加，株高呈先增加后降低的趋势，变化显著（$F=3.269$，$P<0.05$；$F=4.118$，$P<0.05$）。其中，A、B 处理组胁迫 15 d 后，A5、B5 生长变化量最少。C 处理组胁迫 5、10 d 后，植株株高均增加，但胁迫 15 d 后，相较于胁迫 10 d

后的株高，除 C0 组外的各处理组均降低。B2 处理组盐碱浓度与青铜峡地区土壤情况最为接近，相较于胁迫前，盐碱胁迫 5 d，株高平均增加 9.50%；从胁迫 5 d 到胁迫 10 d，植株生长量较少，仅伸长 0.14%；胁迫 10 d 到胁迫 15 d，植株生长速度逐渐恢复，平均伸长 9.56%。

表 1 不同混合盐碱胁迫处理对植株株高的影响

Table 1 Effects of different saline-alkali stresses on the plant height (cm)

处理组 Treatments	胁迫时间/天 Stress Time/d		
	5 d	**10 d**	**15 d**
A0	12.60±1.85b	12.73±0.42b	15.17±0.42a
A1	13.45±1.29a	14.60±1.08a	15.60±1.61a
A2	14.87±1.88a	15.07±2.36a	16.70±1.71a
A3	14.50±0.89a	14.97±3.26a	16.13±0.21a
A4	15.20±2.15a	15.07±2.62a	16.63±1.20a
A5	12.03±1.56a	12.63±0.42a	13.57±0.64a
B0	13.00±1.78b	15.93±1.17a	16.00±0.35a
B1	13.60±1.78a	14.73±1.32a	15.53±1.07a
B2	13.88±0.97a	13.90±0.26a	15.23±0.90a
B3	15.70±1.19b	17.97±1.50ab	17.40±0.53a
B4	14.67±2.15a	15.53±3.55a	16.37±1.04a
B5	13.63±2.30a	14.73±2.72a	14.77±0.60a
C0	14.48±0.73a	14.87±1.70a	15.57±1.18a
C1	14.13±0.93a	15.83±2.35a	15.17±1.70a
C2	14.13±1.56b	16.53±0.51a	14.70±0.70ab
C3	13.45±1.87a	15.87±0.25a	13.93±1.88a
C4	14.10±0.70b	16.40±1.04a	14.5±1.85ab
C5	12.90±2.48a	13.70±1.13a	13.33±1.01a

注：表中数据为平均值±标准差，同一行不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: The value in the table are mean±SE, different letters indicate a significant differences in the same line at (P<0.05). The same below.

2.2 不同盐碱胁迫处理对植株根长变化的影响

盐碱胁迫直接作用于植株的根系，因此根长的变化能直接反应植株根部的生长情况。盐碱胁迫处理前植株的根长为 12.63±0.76 cm（n=6）。如表 2 所示，盐碱胁迫 15 d，相较于盐碱胁迫处理前，A 处理组根长依次增加 31.70%、33.28%、26.95%、16.65%、25.10%、23.78%。B 处理组根长依次增加 34.34%、31.96%、32.49%、28.00%、27.47%、28.53%，C 处理组受盐碱胁迫的影响最大，根长增长最少，依次为 20.61%、18.24%、15.60%、15.60%、10.58%、7.42%。其中，胁迫 15 d，A 处理组除 A4 组外，各处理组根长增长显著，B 处理组中 B0、B1 组根长伸长变化显著，C 处理组受盐碱胁迫影响后各组根长伸长量最少均无显著变化。B2 处理组作为与青铜峡地区盐碱浓度最为接近的处理组，盐碱胁迫 5 d，根长平均伸长 16.39%；从胁迫 5 d 到胁迫 10 d，根系生长缓慢，平均伸长 1.15%；从胁迫 10 d 到胁迫 15 d，根系生长速度逐渐加快，平均伸长 12.52%。

表 2 不同混合盐碱胁迫对根长的影响

Table 2 Effects of different saline-alkali stresses on the root length (cm)

处理组 Treatments	胁迫时间/天 Stress Time/d		
	5 d	**10 d**	**15 d**
A0	13.60±1.37b	14.67±1.29ab	16.63±1.02a
A1	14.20±0.44b	16.03±0.21a	16.83±1.00a
A2	13.50±1.54b	14.53±0.25ab	16.03±0.86a
A3	13.07±0.91b	13.03±0.49b	14.73±0.85a
A4	14.17±1.33a	14.13±0.40a	15.80±0.89a
A5	14.43±0.15b	14.30±0.69b	15.63±0.74a
B0	14.30±1.82b	15.63±0.76ab	16.97±0.38a
B1	14.07±0.40b	15.33±1.00ab	16.67±1.29a
B2	14.70±2.19a	14.87±0.51a	16.73±0.5a
B3	14.17±0.74a	14.93±1.15a	16.17±1.91a
B4	14.30±0.89a	14.33±1.71a	16.10±1.05a
B5	14.57±1.48a	14.60±1.22a	16.23±2.35a
C0	14.67±1.21a	14.70±0.72a	15.23±0.35a
C1	13.83±0.59a	14.27±1.93a	14.93±0.32a
C2	13.83±1.10a	14.17±0.38a	14.60±0.26a
C3	13.57±0.35a	13.93±0.50a	14.60±0.79a
C4	13.53±0.55a	13.83±0.32a	13.97±0.80a
C5	13.37±0.47a	13.50±0.52a	13.57±0.50a

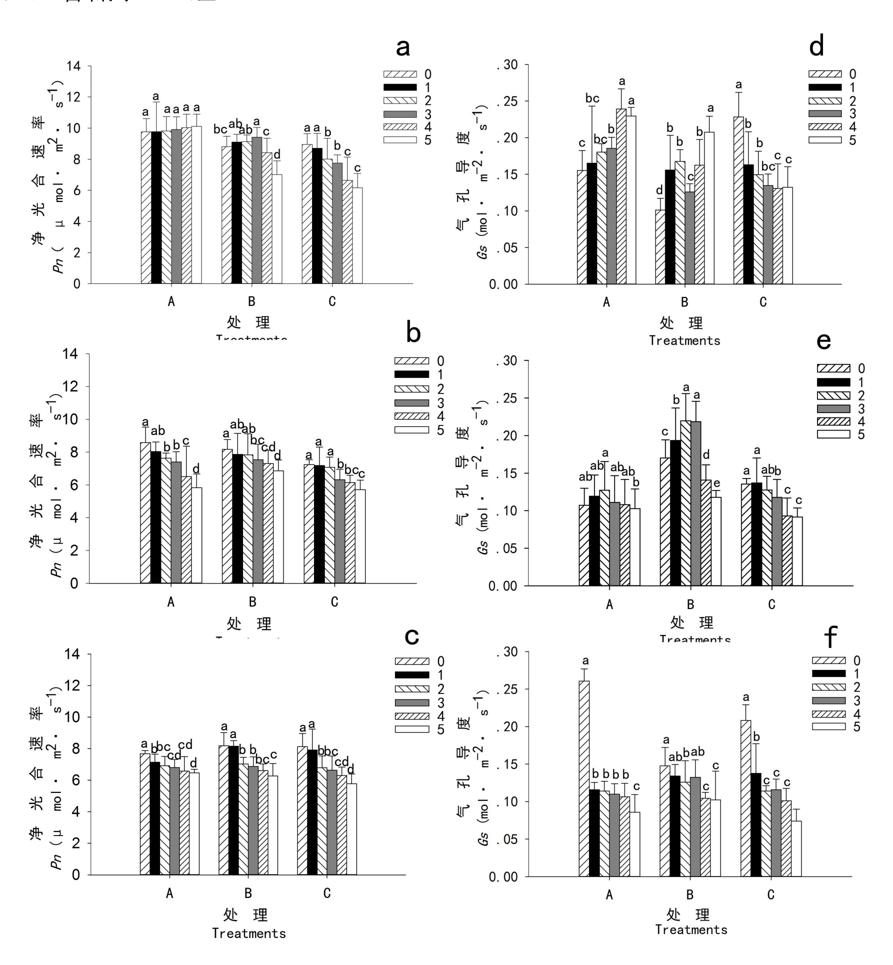
2.3 不同盐碱胁迫处理对植株净光合速率的影响

盐碱胁迫 5、10、15 d 植株净光合速率变化情况如图 1 所示。盐碱胁迫 5 d，随盐浓度增加，A 处理组内净光合速率无显著变化（F=0.283，P>0.05），B 处理组内净光合速率呈先上升后下降的趋势，C 处理组内随盐浓度增加，净光合速率呈显著下降趋势（F=20.415，P<0.01）（图 1：a）；盐碱胁迫 10 d，A、B、C 处理组各组内净光合速率均呈显著下降趋势，其中 A、C 处理组内变化极其显著（F=17.697，P<0.01；F=14.216，P<0.01）（图 1：b）；盐碱胁迫 15 d，A、B、C 处理组内净光合速率均呈极其显著的下降趋势（F=10.646，P<0.01；F=30.713，P<0.01；F=19.266，P<0.01）（图 1：c）。其中，B2 处理组盐碱胁迫 5 d 时，净光合速率明显低于 B0、B1 组，呈显著下降的趋势；盐碱胁迫 10 d，相比较于胁迫 5 d，净光合速率有所上升，与 B1 组净光合速率无显著差异；盐碱胁迫 15 d，由于胁迫时间的延长，B2 组的净光合速率再次呈现显著下降的趋势。

2.4 不同盐碱胁迫处理对植株气孔导度的影响

植株叶片的气孔导度，随胁迫时间的延长，呈不同的变化趋势。盐碱胁迫 5 d，A 处理组气孔导度呈先上升后下降的趋势，B 处理组变化无明显规律性，各处理组间波动较大，C 处理组气孔导度呈显著下降趋势，C0 组气孔导度显著高于各盐溶液胁迫组（F=23.777，P<0.01）（图 1：d）；盐碱胁迫 10 d，A、B 处理组气孔导度均呈先上升后下降趋势，二者分别于 A2、B2 组气孔导度值达到最高，C 处理组除 C0 组外，气孔导度随盐浓度的增加呈显著下降趋势（F=15.486，P<0.01）（图 1：e）；盐碱胁迫 15 d，A、B、C 处理组气孔导度均显著下降（F=259.488，P<0.01；F=8.718，P<0.01；F=54.844，P<0.01）（图 1：f）。其中，与青铜峡地区土壤盐碱浓度最为接近的处理组 B2 组，胁迫 5 d，B2 组气孔导度高于 B0、B1 组；胁迫 10 d，B2 组气孔导度显著高于 B 处理组中各组；盐碱胁迫 15 d，B2 组气

孔导度减小，显著低于 B0 组。



注：1、左侧为混合盐碱胁迫后净光合速率变化情况；右侧为混合盐碱胁迫后气孔导度变化情况；**a, d.** 胁迫 5 d 的变化情况；**b, e.** 胁迫 10 d 的变化情况；**c, f.** 胁迫 15 d 的变化情况。

2. 同一 pH 梯度下不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: 1. Changes of *Pn* were on the left; changes of *Gs* were on the right; **a, d.** Situation of stress 5 d; **b, e.** Situation of stress 10 days; **c, f.** Situation of stress 15 d.

3. Under the same pH gradient, different letters indicated significant differences ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同混合盐碱胁迫对净光合速率、气孔导度的影响

Fig.1 Effects of different saline-alkali stresses on *Pn* and *Gs*

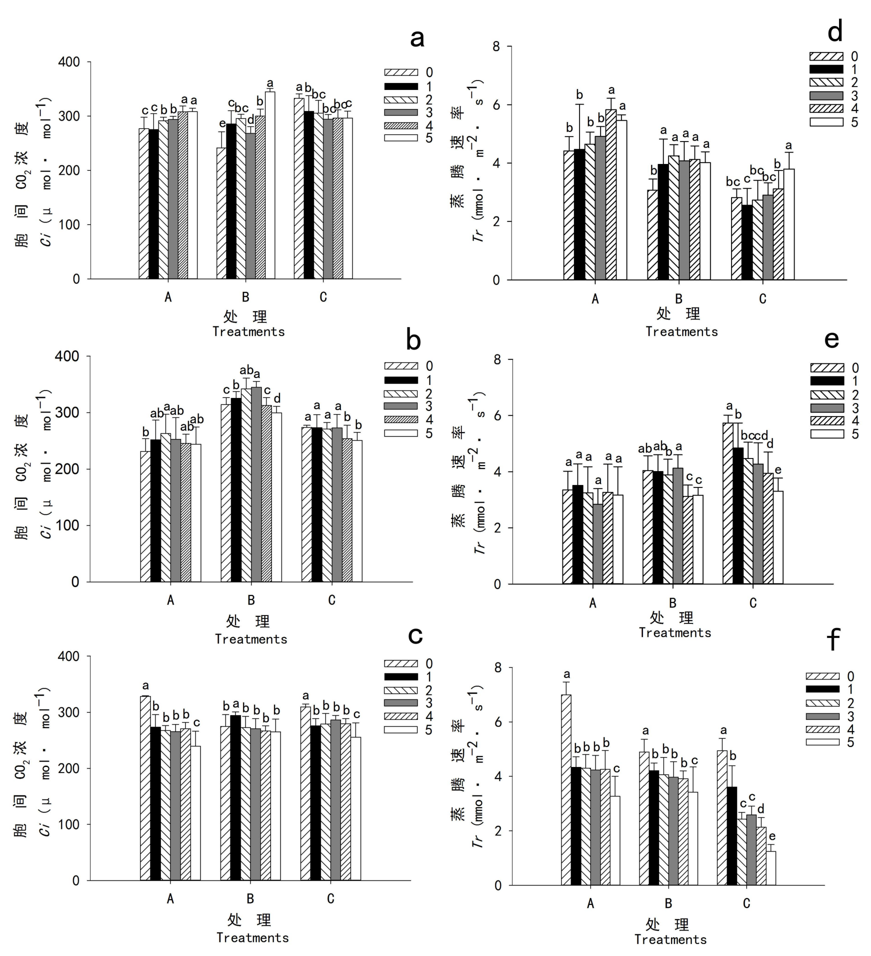
2.5 不同盐碱胁迫处理对胞间 CO_2 浓度的影响

叶片气孔导度的变化直接影响着胞间 CO_2 浓度的变化，胞间 CO_2 浓度在盐碱胁迫的整个过程中波动较小，与气孔导度变化趋势基本一致。盐碱胁迫 5 d，A 处理组内胞间 CO_2 浓度呈显著上升趋势，B 处理组变化无明显规律性，各处理组间波动较大，C 处理组内随盐浓度的增加，胞间 CO_2 浓度呈显著下降趋势（F=11.632，$P<0.01$）（图 2：a）；盐碱胁迫 10 d，A、B 处理组胞间 CO_2 浓度均呈先上升后下降趋势，C 处理组中 C0、C1、C2、C3 组波动较小，C4、C5 组下降显著（图 2：b）；盐碱胁迫 15 d，A、B、C 处理组胞间 CO_2 浓度呈下降趋势，且 A、C 处理组下降显著（F=54.844，$P<0.01$；F=22.707，$P<0.01$）（图 2：c）。由青铜峡地区盐碱浓度，对照 B2 组胞间 CO_2 浓度变化情况，盐碱胁迫 5 d，B2 组胞间 CO_2

浓度高于 B0、B1 组；盐碱胁迫 10 d，B2 组胞间 CO_2 浓度显著高于 B 处理组中各组；盐碱胁迫 15 d，胞间 CO_2 浓度有轻微下降趋势。

2.6 不同盐碱胁迫处理对蒸腾速率的影响

蒸腾速率经长时间盐碱胁迫呈显著下降趋势。盐碱胁迫 5 d，A、B、C 处理组无明显变化规律（图 2：d）。盐碱胁迫 10 d，A、B 处理组无显著变化规律，C 处理组内随盐浓度增加呈显著下降趋势（F=26.343，P<0.01）（图 2：e）。盐碱胁迫 15 d，A、B、C 处理组随盐浓度的增加均呈显著下降趋势（F=83.058，P<0.01；F=11.947，P<0.01；F=144.111，P<0.01）（图 2：f）。B2 组蒸腾速率整体随胁迫时间的延长，蒸腾速率呈下降趋势。胁迫 5 d，B2 组蒸腾速率最高，但无显著差异；胁迫 10 d，B2 组逐渐下降，蒸腾速率略低于 B0、B1 组；胁迫 15d，B2 组蒸腾速率显著低于 B0 组。



注：1、左侧为混合盐碱胁迫后胞间 CO_2 浓度变化情况；右侧为混合盐碱胁迫后蒸腾速率变化情况；**a, d.** 胁迫 5 d 的变化情况；**b, e.** 胁迫 10 d 的变化情况；**c, f.** 胁迫 15 d 的变化情况。

Note: 1. Changes of *Ci* were on the left; changes of *Tr* were on the right; **a, d.** situation of stress 5 d; **b, e.** situation of stress 10 d; **a, d.** situation of stress 15 d.

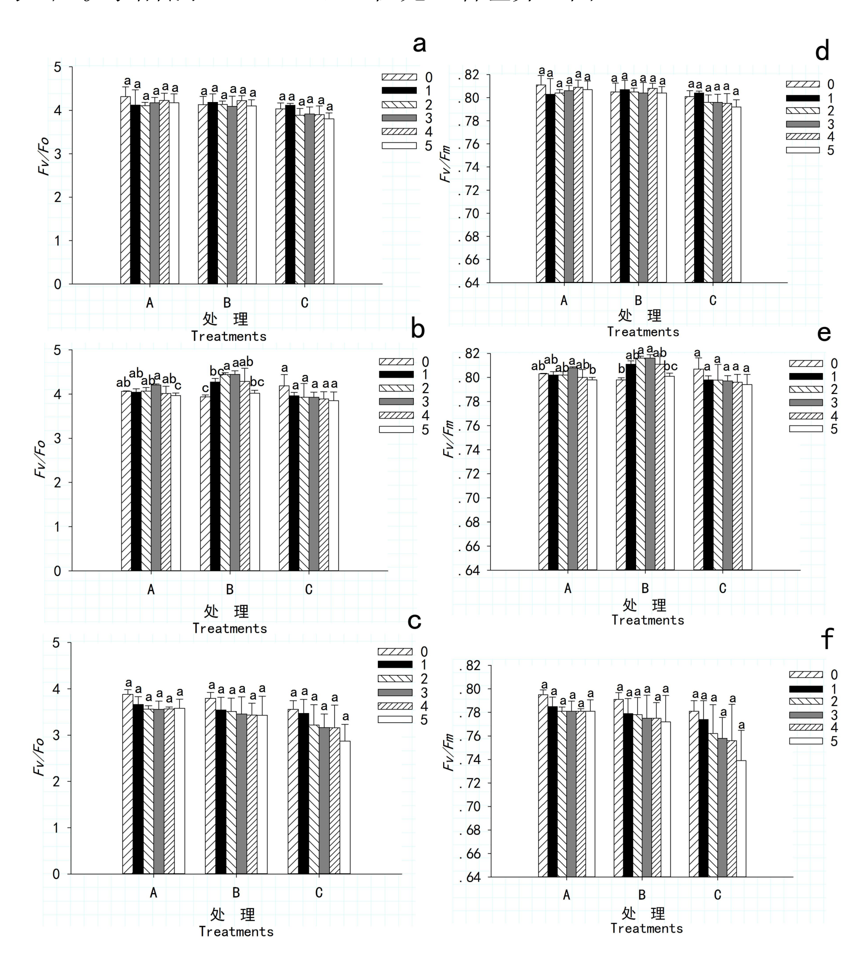
图 2 不同混合盐碱胁迫对胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率的影响

Fig.2 Effects of different saline-alkali stresses on *Ci* and *Tr*

2.7 不同盐碱胁迫处理对叶绿素荧光参数 F_v/F_m、F_v/F_o 的影响

植株叶片光系统 II 最大光化学效率经长时间的盐碱胁迫，虽呈下降趋势，但各处理组间

变化未达到显著程度。盐碱胁迫 5 d，A、B、C 处理组 F_v/F_m 无显著变化（F=0.265，P>0.05；F=0.148，P>0.05；F=1.056，P>0.05）（图 3：a）。盐碱胁迫 10 d，A、B 处理组 F_v/F_m 呈先升高后下降的趋势，C 处理组随盐浓度增加，F_v/F_m 下降，相较于 C0 组，变化量较少且不显著（F=0.649，P>0.05）（图 3：b）。胁迫 15 d，A、B、C 处理组 F_v/F_m 均呈下降趋势，但变化不显著（F=1.423，P>0.05；F=0.361，P>0.05；F=0.916，P>0.05）（图 3：c）。混合盐碱胁迫 5、10、15 d，地被菊光系统 II 潜在光化学活性的变化情况与光系统 II 最大光化学效率变化基本一致，长时间盐碱胁迫，F_v/F_o 呈下降趋势，但 A、B、C 处理组内无显著变化。B2 组 F_v/F_m 与 F_v/F_o 的变化趋势相似，盐碱胁迫 5 d，B2 组 F_v/F_m 与 F_v/F_o 无显著变化趋势（图 3：d）盐碱胁迫 10 d，F_v/F_m 与 F_v/F_o 均于 B2 组达到最高值（图 3：e），胁迫 15 d，B2 组 F_v/F_m 与 F_v/F_o 均略低于 B0、B1 组，但无显著差异（图 3：f）。



注：1. 左侧为混合盐碱胁迫后 F_v/F_m 变化情况；右侧为混合盐碱胁迫后 F_v/F_o 变化情况；**a, d.** 胁迫 5 d 的变化情况；**b, e.** 胁迫 10 d 的变化情况；**c, f.** 胁迫 15 d 的变化情况。

Note: 1. Changes of F_v/F_m were on the left; changes of F_v/F_o were on the right; **a, d.** Situation of stress 5 d; **b, e.** Situation of stress 10 d; **c, f.** Situation of stress 15 d.

图 3 不同混合盐碱胁迫对 F_v/F_m、F_v/F_o 的影响

Fig.3 Effects of different saline-alkali stresses on F_v/F_m and F_v/F_o

3 结论与讨论

土壤盐碱化是影响植物生长、降低植株生产力的主要逆境因素之一，植物能够在盐碱胁迫环境中保持地上、地下部分生物量，维持正常光合生长，是盐碱地区植被改良的重要前提。

衡量植物耐盐碱性的最直接的指标就是胁迫前后株高变化（Liu et al, 2015）。试验表明，低（0、0.2%）、中（0.4%、0.6%）浓度盐胁迫下株高的生长量高于高（0.8%、1.0%）浓度盐胁迫。相比于 pH=7.0、pH=8.0 的处理组，pH=9.0 的各处理组较早（胁迫 10 d）的出现株高逐渐下降的现象。由此可以看出，碱胁迫强度较低时，盐浓度对植株的生长影响更大；碱胁迫强度较高时，碱胁迫的影响更大，且碱胁迫影响高于盐胁迫。相比于茎和叶，根在土壤中作为最直接接触盐碱溶液且受盐碱胁迫时间最长的器官，更能直接的反应植株的生长状况（蔺吉祥等，2011）。实验结果显示，pH=7.0、pH=8.0 各处理组的根伸长生长较多；pH=9.0 的各处理组根伸长生长最少且不显著。其中，pH=8.0 的处理组低浓度盐胁迫（0、0.2%）根伸长生长显著，中（0.4%、0.6%）、高（0.8%、1.0%）浓度盐胁迫根长伸长变化较少。对此赵圣亮（2010）研究指出，根际 pH 值为 7.0-8.0 时，更有利于根系生长，当根处于这个 pH 范围的土壤中时，会向周围土壤环境释放小分子有机酸，有机酸一定程度上可以调节根系土壤的 pH 值，使之达到生长的最佳酸碱度，而当土壤酸碱度超出植物可调节的范围，根系的生长就会受到抑制。青铜峡实验模拟组（B2 组）中寒露红的株高及根长均保持增长的趋势，且生长速度整体呈先降低后增加的趋势，可以看出其可通过自身调节逐渐适应青铜峡的盐碱胁迫。这可能是因为在盐碱胁迫环境促使碳同化产物进行再分配，相对于地上部分，增加了幼苗根系干物质的分配比率，根系增大，相应的吸收面积增加，营养物质充足从而促进植株的生长（夏世龙等，2015）。

光合作用的强弱对植物生长发育以及抗逆性均有重要的影响，因而光合作用参数可作为判断植物生长和抗逆性强弱的指标之一（王艳杰等，2011）。试验表明，长时间盐碱胁迫使各 pH 梯度下植株净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度均呈一定程度的下降趋势。青铜峡盐碱模拟组（B2 组）经过盐碱胁迫后，净光合速率、气孔导度、蒸腾速率虽然略低于对照组，但胞间 CO_2 浓度和对照组无显著性差异。呈现这种现象可能是由于气孔导度的影响（郑国琦等，2002），盐碱胁迫导致根部 K^+外流，离子不平衡使气孔导度减小，光合作用减弱，相应的 CO_2 的消耗量减少。

激发能的捕获和能量转换由光系统 I 和光系统 II 相互协调共同完成,当激发能捕获与能量转换发生失衡时就会导致光系统间电子传递或激发状态不平衡。当植物吸收的光能超过所能利用的能量时，过剩的光能就会导致光合系统发生光抑制，甚至光破坏。F_v/F_m 的降低是植物发生光抑制最明显的特征（Everard et al，1994；Lu et al，2003）。本次试验中植株经过盐碱胁迫，叶片光系统 II 最大光化学效率 F_v/F_m 及光系统 II 潜在光化学活性 F_v/F_o 均呈轻微下降趋势，但下降不显著，说明盐碱胁迫在一定程度上降低了光合器官的活性，叶片中对碳的固定和同化减少，但未引起严重的光合电子传递受阻及光抑制的现象，植物叶片中光合系统并未受到严重损伤。在盐碱胁迫 10 d 时，F_v/F_o 及 F_v/F_m 在 pH=8.0 的处理组呈先上升后下降的趋势，于青铜峡试验模拟组（B2 组）达到最大值。结合光合特性分析，气孔导度、胞间 CO_2 浓度也相应的达到最大值，净光合速率和蒸腾速率相比较于胁迫 5 d 时也有逐渐升高的趋势，说明在短时间内一定的盐碱浓度促进了光合作用的进行，光合系统接受与传递电子的能力提高，相应的叶绿素荧光参数也呈上升的趋势。盐碱胁迫 15 d 时，青铜峡试验模拟组植株 F_v/F_m 及 F_v/F_o 呈轻微下降趋势，但下降不明显，说明植株在这种土壤环境中光合系统电子传递未受严重影响，具有一定程度的抗盐碱性。

植物在混合盐碱胁迫下，株高、根长、光合特性、叶绿素荧光均受到不同程度的影响。从混合盐碱胁迫对寒露红的影响来看，长时间高盐环境或高碱环境均不利于植株生长发育及光合作用的进行。对于寒露红在青铜峡地区的适生性来看，在青铜峡的中度盐碱胁迫的环境中，植株光合作用的正常进行，地上及地下部分的生长正常，光系统 II 潜在光化学活性、最

大光化学效率虽有轻微下降趋势，但下降未达到显著水平，说明光合系统电子传递基本正常，盐碱胁迫尚处于植株可调节范围。由此可以得出，地被菊寒露红具有一定抗盐碱性，在青铜峡地区的盐碱胁迫强度下，基本能够正常生长，可用于植被及生态环境修复。

参考文献：

CUI JP, 2005. Preliminary studies on drought resistance of grand-cover Chrysanthemum[D]. Beijing: Beijing Forestry University: 1-65. [崔娇鹏，2005. 地被菊抗旱节水性初步研究[D]. 北京：北京林业大学：1-65.]

EVERARD JD, GUCCI R, KANN SC, et al, 1994. Gas exchange and carbon partitioning in the leaves of celery(*Apium graveolens* L.)at various levels of root zone salinity[J]. Plant Physiol, 106(1): 281-292.

FAN LQ, YANG JG, XU X, et al, 2012. Salinity characteristics of soil and correlation saline-alkali soil in Ningxia irrigation district[J]. Chin Agric Sci Bull, 28(35): 221-225. [樊丽琴，杨建国，许兴，等, 2012. 宁夏引黄灌区盐碱地土壤盐分特征及相关性[J]. 中国农学通报，28(35)：221-225.]

GUO R, LI F, ZHOU J, et al, 2016. Eco-physiology response of linseed (*Linum usitatissimum*)to salt and alkali stresses[J]. Chin J Plant Ecol, 40(1): 69-79. [郭瑞，李峰，周际，等, 2016. 亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征[J]. 植物生态学报，40(1)：69-79.]

HUANG YX, 2010. Study on trend of soil salinization and soil productive potentiality in Pingluo Country Ningxia[D]. Yangling: Northwest A & F University: 1-63. [黄玉霞，2010. 宁夏平罗县盐渍土变化趋势及土壤生产潜力的研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学：1-63.]

JING X, BAI YX, BAI YX, et al, 2015. The Dynamic changes in cold tolerance of ground-cover Chrysanthemum growing in the open field during the overwintering[J]. Agric Sci Technol, 16(11): 2399-2405, 2436.

JU M, 2008. Comparative stress effects of salt-alkaline mixed conditions on *Avena sativa*[D]. Jilin: Northeast Normal University: 1-44. [鞠淼，2008. 盐及盐碱混合条件对燕麦胁迫作用的比较[D]. 吉林：东北师范大学：1-44.]

KALAJI HM, JAJOO A, OUKARROUM A, et al, 2016. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. Acta Physiol Plant, 38(4): 102-112.

LI XF, NI ZM, WU YY, 2015. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and leaf cell structure of ‘inhong’ grape seedlings[J]. Acta Ecol Sin, 35(13): 4436-4444. [李学孚，倪智敏，吴月燕，等, 2015. 盐胁迫对‘鄞红’葡萄光合特性及叶片细胞结构的影响[J]. 生态学报，35(13)：4436-4444.]

LI YN, FAN JP, ZHANG YC, et al, 2015. Study on the improvement of coastal saline land and the selection for landscape plants[J]. J Shandong Agric Univ, 46(4): 549-553. [李亚南，樊金萍，章彦琛，等, 2015. 滨海盐碱地的改良与景观植物筛选研究[J]. 山东农业大学学报，46(4)：549-553.]

LIAO WB, XIAO HL, ZHANG ML, 2010. Effect of nitric oxide and hydrogen peroxide on adventitious root development from cuttings of ground-cover Chrysanthemum and associated biochemical changes[J]. J Plant Growth Regul, 29(3): 338-348.

LIN JX, LI XY, TANG JH, et al, 2011. Effects of salt and alkali stresses on seed germination,early seedling growth and the metabolize of Na^+ and K^+ in shoots of wheat[J]. J Tritic Crops, 31(6): 1148-1152. [藺吉祥，李晓宇，等, 2011. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及 Na^+、K^+代谢的影响[J]. 麦类作物学报，31(6)：1148-1152.]

LIU ZX, ZHANG HX, YANG S, et al, 2014. Effects of NaCl stress on growth and photosynthetic characteristics of *Elaeagnus angustifolia* seedlings[J]. Sci Silv Sin, 50(1): 32-40. [刘正祥，张华新，杨升，等, 2014. NaCl胁迫对沙枣幼苗生长和光合特性的影响[J]. 林业科学，50(1)：32-40.]

LIU BS, KANG CL, WANG X, et al, 2015. Physiological and morphological responses of *Leymus chinensis* to saline-alkali stress[J]. Grassland Sci, 61(4): 217-226.

LIU JX, WANG JC, WANG RJ, et al, 2015. Effect of salt and alkali stress on photosysthesis in *Avena nuda*

seedlings[J]. Agric Res Arid area, 33(6): 155-160. [刘建新，王金成，王瑞娟，等, 2015. 盐、碱胁迫对燕麦幼苗光合作用的影响[J]. 干旱地区农业研究，33(6)：155-160.]

LU CM, JIANG GM, WANG BS, et al, 2003. Photosystem Ⅱ photochemistry and photosynthethic pigment composition in salt-adapted halophyte Artimisia anethifolia grown under outdoor conditions[J]. J Plant Physiol, 160(4): 403-408.

LU NW, DUAN BL, LI CY, 2007. Physiological responses to drought and enhanced UV-B radiation in two contrasting picea asperata populations[J]. Can J Forest Res, 37(7): 1253-1262.

LUO MJ, ZHAO YX, WANG YD, et al, 2018. Comparative proteomics of contrasting maize genotypes provides insights into salt-stress tolerance mechanisms[J]. J Proteome Res, 17(1): 141-153.

NIU L, 2013. The response of structural evolvement and physiological in Glycine under salt stress and alkali stress[D]. Jilin: Northeast Normal University: 1-130. [牛陆，2013. 盐、碱胁迫对大豆属植物的结构演化及生理特性的影响[D]. 吉林：东北师范大学：1-130.]

RUIZ KB, BIONDI S, MARTINEZ EA, et al, 2016. Quinoa-a model crop for understanding salt-tolerance mechanisms in halophytes[J]. Plant Biosyst, 150(2): 357-371.

SHI DC, WANG D, 2005. Effects of various salt-alkaline mixed stresses on *Aneurolepidum chinense* (Trin.) Kitag.[J]. Plant Soil, 271(1-2): 15-26.

SHI LR, ZHAO BC, BAI LR, 2010. The study on salt tolerance of groune-cover Chrysanthemum[J]. Chin Agric Sci Bull, 26(12): 139-142. [时丽冉，赵炳春，白丽荣，2010. 地被菊抗盐性研究[J]. 中国农学通报，26(12)：139-142.]

TIAN CX, ZHANG YM, WANG K, et al, 2014. The anatomical structure response in alfalfa to salinity-alkalinity stresses of $NaHCO_3$[J]. Acta Pratacult Sin, 23(5): 133-142.[田晨霞，张咏梅，王凯，等, 2014. 紫花苜蓿组织解剖结构对 $NaHCO_3$ 盐碱胁迫的响应[J]. 草业学报，23(5)：133-142.]

WANG P, YANG CJ, JIAO Z, 2010. Effect of NaCl stress on seed germination and seedling growth of wheat[J]. Chin Agr Sci Bull, 26(2): 127-131. [王萍，杨春桥，焦阵，2010. NaCl 胁迫对小麦种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报，26(2)：127-131.]

WANG ZC, YANG F, QI CY, 2010. Effect of salinity and sodicity stresses on pollen surface characteristics and viability of rice[J]. Chin J Appl Environ Biol, 16(1)：63-66. [王志春，杨福，齐春艳，2010. 盐碱胁迫对水稻花粉扫描特征和生活力的影响[J]. 应用与环境生物学报，16(1)：63-66.]

WANG YJ, XUE DY, PENG Y, 2011. Analysis of secondary metabolites blackberry fruit composition of anthocyanin[J]. N Hortic, 35(16): 30-36. [王艳杰，薛达元，彭羽，2011. 盐碱胁迫对两个葡萄品种光合作用-光响应特性的影响[J]. 北方园艺，35(16)：30-36.]

WANG Q, LIU Q, GAO YN, et al, 2017. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecol Sin, 37(16): 5565-5577. [王佺珍，刘倩，高娅妮，等, 2017. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报，37(16)：5565-5577.]

XIA SL, ZHANG Y, SUN S, et al, 2015. Effects of salt and alkali stresses on growth and dry matter accumulation of muskmelon seedling[J]. Jilin Agric Sci, 40(5): 97-101. [夏世龙，张宇，孙爽，等, 2015. 盐碱胁迫对甜瓜幼苗生长和物质积累的影响[J]. 吉林农业科学，40(5)：97-101.]

YANG BM, WANG RS, XIAO HJ, et al, 2018. Spatio-temporal variations of soil water content and salinity around individual *Tamarix ramosissima* in a semi-arid saline region of upper the Yellow River, Northwest China[J]. J Arid Land, 10(1): 101-114.

ZHANG L, SUN XY, SHANG HC, et al, 2010. Review and prospect of improvement present situation on coastal saline-alkali area in Tianjin[J]. Chin Agric Sci Bull, 26(18): 180-185. [张璐，孙向阳，尚成海，等, 2010. 天津滨海地区盐碱地改良现状及展望[J]. 中国农学通报，26(18)：180-185.]

ZHANG Y, CAI YJ, TIAN ZP, et al, 2016. The study on salt tolerance of groune-cover Chrysanthemum snow

princess[J]. Heilongjiang Agr Sci, 2(2): 87-90. [张雨，蔡英杰，田忠平，等, 2016. 地被菊雪公主抗盐性研究[J]. 黑龙江农业科学，2(2)：87-90.]

ZHAO SL, 2010. Physiological responses of *Kochia sieversiana* and effects of root on rhizosphere environment during adapation to mixed salt-alkaline stress[D]. Jilin: Northeast Normal University: 1-39. [赵圣亮，2010. 混合盐碱胁迫下碱地肤根系对根外环境的影响及生理响应[D]. 吉林：东北师范大学：1-39.]

ZHENG GQ, XU X, XU ZZ, et al, 2002. The effect of salt stress on the stomatal and non-stomatal limitation of photosynthesis of *Lycium barbarum*[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 22(6): 1355-1359. [郑国琦，许兴，许兆桢，等, 2002. 盐胁迫对枸杞光合作用的气孔和非气孔限制[J]. 西北植物学报，22(6)：1355-1359.]